

Comportamento de ondas ultrassônicas no Granito Mauá para a conservação do Monumento às Bandeiras

Ultrasonic waves behavior on Mauá Granite for the conservation of Monumento às Bandeiras

Alexander Martin Silveira Gimenez¹ e Eliane Aparecida Del Lama¹

¹Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo - USP, Rua do Lago 562, CEP 05508-080, São Paulo, SP, BR
(alexander.gimenez@usp.br; edellama@usp.br)

Recebido em 29 de janeiro de 2014; aceito em 30 de junho de 2014

Resumo

O Monumento às Bandeiras de Victor Brecheret, constituído pelo Granito Mauá, é um símbolo do povo paulistano e também uma das principais obras de um dos mais importantes artistas brasileiros. Este estudo se insere no contexto da importância cultural e histórica desse monumento, que representa significativo período da história paulista, e principalmente no intuito de contribuir com sua conservação através da avaliação da rocha que o compõe, usando de método não destrutivo baseado na propagação de ondas ultrassônicas. O estudo abordou a caracterização de uma amostra *sã* da mesma rocha do monumento, coletada no seu local de ocorrência, efetuando-se o comparativo entre os valores das velocidades obtidas nessa amostra com as obtidas diretamente no monumento. As medições tanto no monumento como no laboratório abordaram a aplicação de três formas de transmissão, direta, semidireta e indireta, que por sua vez, foram aplicadas utilizando três pares de transdutores distintos, 54 e 150 kHz e exponenciais de 54 kHz, sendo compatíveis ao estudo do monumento as transmissões direta e indireta utilizando os transdutores de 54 e 150 kHz. Após análise dos resultados, pode-se concluir que o Monumento às Bandeiras ainda permanece em boas condições de conservação, uma vez que as velocidades de propagação de ondas ultrassônicas obtidas no monumento apresentaram-se na ordem de 4,6 a 5,3 km/s, variando de acordo com o tipo de transmissão aplicada. No laboratório, os resultados obtidos variaram de 5,2 a 5,6 km/s.

Palavras-chave: Ultrassom; Métodos não destrutivos; Monumento às Bandeiras; Granito Mauá; Conservação.

Abstract

The *Monumento às Bandeiras* by Victor Brecheret is constituted of Mauá Granite. It is a symbol of the city of São Paulo and a masterpiece by one of the most important Brazilian artists. This study aimed to assess the conservation status of this monument by using the non-destructive method of propagation of ultrasonic waves. The assessment was carried out considering the importance of this monument, which represents a significant period of São Paulo history, and mainly to contribute to its conservation by using a geological approach. In this study, the values of the P-wave velocities in the monument were compared with the values obtained in the laboratory sample, which was collected in the original quarry of the same stone as the monument. Appropriate methodologies were used in this study to obtain the values of velocities in laboratory and *in situ*. Three types of transmission were used: direct, semi-direct and indirect, with three different transducer pairs: 54 and 150 kHz and and exponentials of 54 kHz. Only the 54 kHz and 150 kHz transducers were compatible to the study of the monument using direct and indirect transmissions. The result of these evaluations indicates that the *Monumento às Bandeiras* is still in good conservation condition, based in the P-wave velocities: *ca.* 4.6 – 5.3 km/s, obtained directly in the monument, varying according to the type of transmission applied, and 5.2 – 5.6 km/s in the laboratory tests. These values are in accordance with non-altered granites.

Keywords: Ultrasound; Non-destructive method; Monumento às Bandeiras; Mauá Granite; Conservation.

INTRODUÇÃO

A utilização de rochas como elementos construtivos é uma prática que remonta à evolução humana. Desde a antiguidade, as rochas têm uma participação expressiva no contexto da arte e da construção civil.

Diversas são as culturas antigas que possuíam a capacidade de trabalhar a pedra, executando obras civis, esculturas ou monumentos. Muitas destas obras de arte espalhadas pelo mundo resistiram até hoje à exposição ao ambiente e às intervenções humanas.

No entanto, no último século, a deterioração do patrimônio histórico construído foi mais expressiva, ao mesmo tempo em que, por outro lado, é alavancada a consciência quanto às necessidades de sua conservação. Ocorre então um cenário inicial caracterizado pela urgência de aplicação de intervenções no intuito de evitar a destruição completa das obras, estas por muitas vezes pouco afortunadas, as quais, por falta de conhecimento dos processos de alteração dos materiais, desencadearam reações que se almejavam evitar (Moreno, 2003).

Inúmeras são as obras constituintes do patrimônio histórico mundial confeccionadas inteira ou parcialmente em rocha, material selecionado por sua durabilidade e disponibilidade local. No entanto, o desconhecimento de suas propriedades pode acarretar problemas posteriores, muitas vezes irreversíveis, e é nesse contexto que a participação de profissionais com conhecimento aplicado de geociências se torna imprescindível para a conservação do patrimônio (Del Lama, 2006).

Este trabalho trata de um estudo em geociências aplicado à conservação do patrimônio histórico construído, utilizando o método de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas na avaliação do Monumento às Bandeiras de Victor Brecheret, e por se tratar de uma obra de grande importância artística e cultural para o povo paulistano e um dos símbolos da cidade de São Paulo, exigiu que seu estudo abordasse uma metodologia não destrutiva, ou seja, uma forma de avaliação que não gerasse nenhuma forma da alteração química ou física ao seu estado atual.

A propagação de ondas ultrassônicas é um dos parâmetros mais comumente utilizados para auxiliar os cientistas na avaliação do estado de degradação de rochas presentes em monumentos e esculturas, auxiliando na avaliação dos mecanismos específicos de degradação (Valdeón et al., 1992). Diversos autores utilizaram o método da propagação de ondas ultrassônicas para estudos de rochas, tais como: Rossi-Manaresi e Tucci (1983), Topal e Doyuran (1995), Köhler et al. (1996), Almesberger et al. (2000), Papida et al. (2000), Sheremeti-Kabashi e Snethlage (2000), Frascá (2003), Navarro et al. (2003), Maia (2004), Fitzner (2004), Silva (2005), Myrin e Malaga (2008), Marques et al. (2010), Rodrigues (2012), Grossi (2013) e Kuzmickas (2013).

Neste estudo, a metodologia de ensaio contou com a adaptação dos procedimentos sugeridos pelas normas ABNT NBR 8802/94 - Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica e a ASTM D 2845/08 – *Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock*, de forma a adequar sua utilização para estudos em monumentos.

OBJETO DE ESTUDO

Esboçado por Victor Brecheret em 1920, no início do movimento modernista, e inaugurado em 1953, o Monumento às Bandeiras é um dos marcos visuais da cidade de São Paulo. Nos 33 anos que envolveram o período entre a idealização e a inauguração do monumento, Brecheret se deparou com dificuldades que englobaram desde o financiamento da obra, iniciada somente em 1936, passando por paralisações e até problemas de ordem política que transferiram a responsabilidade do governo do estado para a prefeitura do município de São Paulo, que firmou contrato com o autor em 1946, assim seguindo os trabalhos ativamente até a conclusão da obra (Batista, 1985).

A escolha da rocha para a confecção do monumento ocorreu em função de questões técnicas envolvidas no fornecimento, pois, de acordo com o Departamento de Patrimônio Histórico do Município de São Paulo (DPH), era oferecido por uma pedreira o Granito Itaquera, de granulação fina e duro de desbastar. No entanto, esta pedreira teve dificuldades em fornecer blocos nas dimensões necessárias para a obra. A concorrência acabou sendo ganha pela firma Irmãos Milanezi, fornecendo o Granito Mauá, originário do município homônimo, que permitia a retirada de blocos, sendo este granito de granulação mais grossa e menos penoso ao desbaste (Figura 1), conforme descrito no sítio eletrônico do DPH.



Fonte: Batista (1985).

Figura 1. Bloco sendo trabalhado. Oficina Incerpi, fim dos anos 40.

O Granito Cinza Mauá é uma das rochas ornamentais mais utilizadas em São Paulo desde as primeiras décadas do século XX (Del Lama et al., 2009). Das utilizações mais conhecidas do Cinza Mauá, excetuando-se sua utilização na confecção de monumentos, estão o calçamento do centro velho de São Paulo e o piso das estações de metrô da cidade.

O Granito Mauá ocorre no leste paulista e pertence à Província Mantiqueira, definida por Almeida et al. (1977, 1981), inserido entre as diversas intrusões graníticas neo-proterozoicas da porção central da Faixa de Dobramentos Ribeira no Domínio Embu (Janasi et al., 2003).

Petrograficamente, este granito apresenta textura fanerítica porfirítica, sendo constituído por microclínio perítico (35%), oligoclásio (30%), quartzo (28%), biotita marrom (7%) e traços de epidoto, allanita, zircão, apatita, titanita, opacos, clorita, sericita e carbonato (Del Lama et al., 2009). Corresponde a um biotita granito de textura inequigranular a porfirítica, com megacristais de feldspato potássico de 1,0 a 1,5 cm, apresentando bandamento magmático e enclaves, em sua maioria, microgranulares de composição granítica (Alves, 2009) e diorítica.

MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em duas etapas, que contemplaram as avaliações adquiridas em amostra de laboratório e as efetuadas diretamente sobre o Monumento às Bandeiras. As caracterizações em laboratório foram executadas previamente, objetivando levantar a técnica mais adequada ao mesmo, bem como levantar os valores de propagação ultrassônica da rocha não alterada como parâmetro para as medições no monumento.

Os estudos realizados em laboratório requereram a coleta de amostras de rocha do Granito Cinza Mauá, efetuada no município de Ribeirão Pires, São Paulo, nas proximidades da Estrada de Sapopemba, em travessa não pavimentada da Av. Miro Atílio Peduzzi, no acesso à Pedra do Elefante, ponto

turístico local onde se localiza o afloramento, e são visíveis as evidências da extração de rochas de cantaria (Figura 2).

Foi selecionada uma amostra com dimensões aproximadas de 40 x 20 x 12 cm. Quatro faces foram serradas para proporcionar superfícies planas para as análises, e posteriormente foi limpa com água. A amostra foi mantida em temperatura ambiente até a completa secagem.

As análises laboratoriais foram realizadas no Laboratório de Métodos Não Destrutivos e Patrimônio Histórico do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, com os mesmos equipamentos previstos para utilização nas avaliações no monumento, com o objetivo de minimizar interferências sobre as leituras efetuadas em ambos.

Foi utilizado o aparelho de ultrassom V-Meter Mark III da James Instruments Inc. (Figura 3A), com os seguintes transdutores: planos de 54 kHz com diâmetro de 5,0 cm (Figura 3B), planos de 150 kHz com diâmetro de 2,2 cm (Figura 3C), e exponenciais de 54 kHz de contato pontual (Figura 3D).



Foto: Lauro K. Dehira.

Figura 2. Afloramento do Granito Cinza Mauá em Ribeirão Pires, São Paulo, local de extração de cantaria.

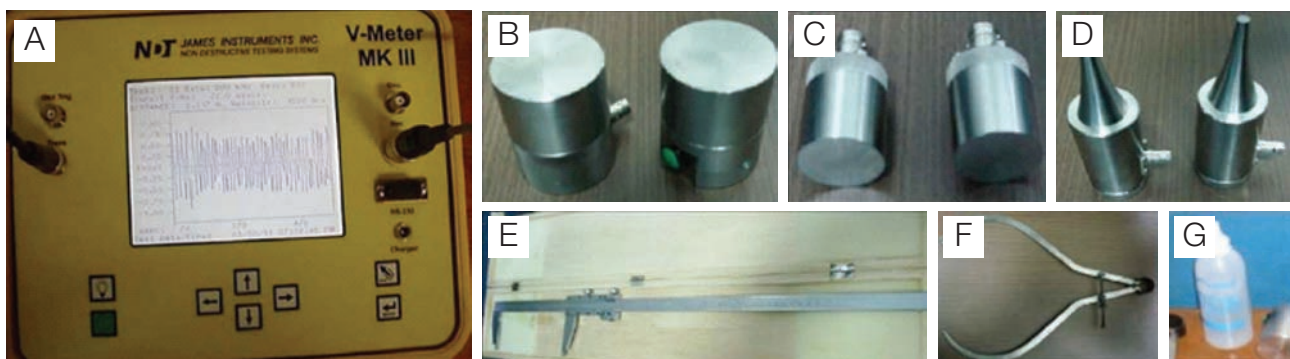


Figura 3. Equipamentos utilizados neste estudo. (A) aparelho de ultrassom V-Meter Mark III da James Instruments Inc.; (B) transdutores planos de 54 kHz; (C) transdutores planos de 150 kHz; (D) transdutores exponenciais de 54 kHz; (E) paquímetro; (F) compasso externo; (G) gel de ultrassom.

Para efetuar as medidas das distâncias entre os transdutores emissor e receptor, foram usados paquímetro (Figura 3E) e compasso externo (Figura 3F). Gel de ultrassom (Figura 3G) foi utilizado para acoplar os transdutores à superfície da rocha.

Previamente à etapa de estudos no Monumento às Bandeiras, foi solicitado ao DPH do Município de São Paulo, autorização de acesso ao monumento, por se tratar de obra de arte tombada de responsabilidade da prefeitura.

Os trabalhos no monumento ocorreram sempre com condições climáticas estáveis e em dias ensolarados, durante a manhã, adotando como critério pelo menos uma semana após períodos chuvosos. Esta medida foi tomada para evitar interferência da umidade sobre os ensaios.

No monumento, as dimensões foram levantadas com auxílio de paquímetro, onde os pontos de leitura permitem determinar a distância do ponto de emissão até o ponto de recepção da onda. Os bicos do paquímetro, em alguns casos, não alcançaram os pontos de faces posteriores do monumento. Para estes casos, a medição foi feita com o auxílio do compasso externo, que permite fixar a abertura entre os pontos. Posteriormente, retira-se o compasso com a dimensão fixada e mede-se a distância com auxílio de paquímetro ou trena.

Como somente o paquímetro permite a determinação da distância com precisão igual ou superior a 0,1 mm, determinou-se que a precisão para os pontos lidos com o auxílio do compasso externo apresentam precisão de 1 mm.

Para todas as leituras efetuadas no Monumento às Bandeiras, da mesma forma que no laboratório, fez-se uso de acoplante em gel, sendo que a quantidade de acoplante utilizado para cada situação foi condicionada à rugosidade da superfície de análise de cada ponto.

No monumento, após a execução das leituras realizadas, procedeu-se a limpeza para remoção do acoplante, efetuada com água e escova de nylon com cerdas macias, e inspeção para a certificação de que todos os resíduos do acoplante haviam sido eliminados da superfície.

O critério de definição da leitura do valor do tempo de percurso da onda através do corpo ensaiado consiste na estabilidade/repetibilidade do valor apresentado pelo aparelho em três ou mais emissões do pulso ultrassônico, ou seja, para cada leitura executada neste trabalho, o resultado apresentado pelo aparelho repetiu, no mínimo, três vezes consecutivas para ser considerado válido.

É importante acrescentar que este critério de estabilidade de leitura mostrou-se ineficiente na utilização do par de transdutores exponenciais em função da alta variação dos resultados para um mesmo ponto, ocorrência esta que se manteve tanto nas leituras de laboratório quanto nas leituras efetuadas no monumento.

MÉTODO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS

Ondas ultrassônicas são ondas mecânicas, classificadas dentro do grupo das ondas sonoras, compreendidas no intervalo de 20 a 20.000 kHz.

Pelizan (2004) indica técnicas distintas para a execução de ensaios de propagação de ondas ultrassônicas, consistindo em princípios similares e variando principalmente na forma de aplicação e nos meios de propagação.

A técnica empregada neste estudo é a mais comumente utilizada, chamada de técnica da transmissão, que consiste no uso de dois transdutores, um emissor e outro receptor, posicionados em pontos distintos da amostra. As ondas ultrassônicas nela empregada são as ondas longitudinais ou compressivas (ondas P).

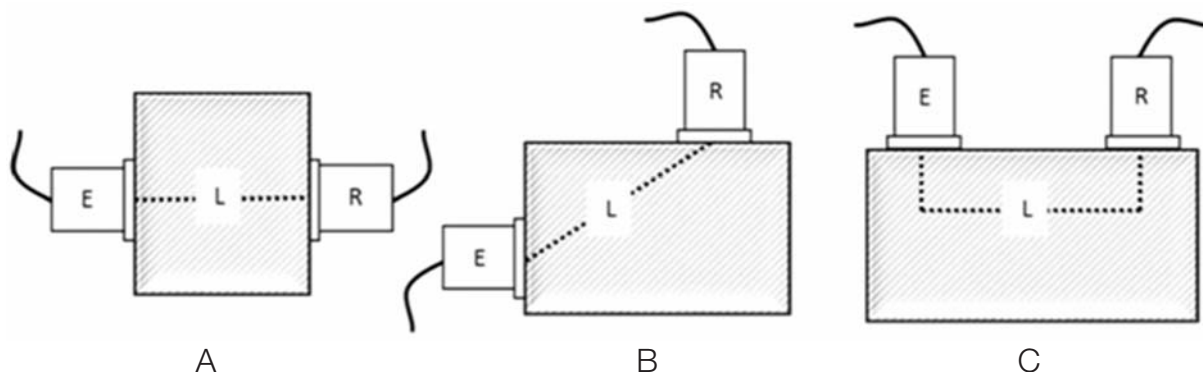
Transdutores são terminais que devem ser conectados por cabos coaxiais ao aparelho de ultrassom. Esses são responsáveis pela conversão do pulso elétrico em onda mecânica ultrassônica durante a emissão, e também pelo processo inverso na recepção das ondas.

A execução do ensaio de ultrassom por esse método requer um equipamento que, em conjunto com um par de transdutores, seja capaz de registrar o tempo de percurso das ondas ultrassônicas através do material em análise. A razão da distância entre os transdutores e o tempo de percurso do pulso na amostra fornece a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.

A norma brasileira ABNT NBR 8802/94 aponta três tipos de transmissão: direta, semidireta e indireta (Figura 4). A transmissão direta consiste no posicionamento dos transdutores frontalmente em faces opostas do objeto de estudo, permitindo que a onda atravessasse o corpo; a transmissão semidireta ocorre pelo posicionamento dos transdutores em faces perpendiculares, e a transmissão indireta é o posicionamento dos transdutores em um mesmo plano ou face do objeto. Embora a referida norma seja destinada à avaliação de estruturas de concreto, o método é adaptável para ensaios em rochas, por exemplo, nas avaliações de laboratório executadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), conforme descrito no relatório de ensaio nº 1046 701-203 emitido em 27 de junho de 2013.

A norma norte-americana ASTM D 2845/08 descreve o método aplicável especificamente em rochas. No entanto, não prevê avaliações a serem executadas em campo.

Sendo assim, as duas normas foram tomadas como bases de referência para o desenvolvimento da pesquisa efetuada no comparativo entre as avaliações de laboratório do Granito Mauá com as avaliações efetuadas no Monumento às Bandeiras.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8802/94.

Figura 4. Tipos de Transmissão. (A) transmissão direta; (B) transmissão semidireta; (C) transmissão indireta. (E) representa o transdutor emissor, (R) representa o transdutor receptor e (L) é a distância entre transdutores.

Procedimento de ensaio

Uma grande vantagem nos aparelhos de ultrassom é a sua portabilidade, sendo possível efetuar avaliações tanto em laboratório quanto em campo.

Devem ser avaliados os tipos de transdutores para uso no estudo, pois esses variam de acordo com a frequência ultrassônica emitida e recebida, e também apresentam variações em seu formato, apresentando superfícies de contato planas ou pontuais. A escolha deve ocorrer em função das dimensões do objeto e das condições superficiais para o contato. Neste trabalho, foram utilizados transdutores planos de 54 e 150 kHz e transdutores pontuais de 54 kHz, conhecidos também como transdutores exponenciais.

Também em função das dimensões e formas do objeto de estudo, deve-se determinar qual o tipo de transmissão a ser empregada, buscando preferencialmente aplicar a transmissão direta, seguida pela semidireta e em último caso a indireta. Os resultados dos distintos tipos de transmissão não devem ser avaliados juntos, pois o posicionamento dos transdutores na amostra influencia na recepção da onda, sendo o sinal da onda ultrassônica maior na transmissão direta e menor na indireta.

Posteriormente a essas verificações, é iniciado o processo de ensaio, que consiste nas seguintes etapas:

- conectar os transdutores previamente escolhidos ao aparelho de ultrassom com o auxílio de cabos coaxiais, que garantem a mobilidade dos mesmos, favorecendo o contato com o objeto de estudo;
- os transdutores emissor e receptor devem ser posicionados com suas áreas de contato sobre o objeto, utilizando acoplante, material viscoso que auxilia no contato entre transdutores e a superfície da amostra em análise. No estudo em questão, foi utilizado gel específico para ultrassom, por ser de fácil limpeza e remoção com água.

É possível, entretanto, empregar outros materiais como acoplantes, como graxa, glicerina, etc.;

- quando acionado o aparelho, o pulso emitido pelo transdutor emissor percorre a amostra até alcançar a superfície onde se encontra o transdutor receptor;
- o transdutor receptor, devidamente acoplado à amostra, recebe a onda e envia o sinal para o aparelho;
- o aparelho determina o tempo de percurso da onda através da amostra e apresenta esse valor no visor. Alguns equipamentos podem exibir o valor da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no visor, desde que a distância entre transdutores seja inserida previamente ao ensaio.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Determinações no monumento

O Monumento às Bandeiras é uma obra com formas volumétricas de grandes dimensões. As figuras que o compõem representam corpos humanos, cavalos e uma canoa, bem como alguns objetos que são representados juntamente às figuras. Essa característica das formas, que se aproximam à anatomia de corpos humanos, restringe muito o paralelismo perfeito de faces para a determinação de pontos de leitura, uma vez que os métodos sugeridos pelas normas NBR 8802/94 e ASTM D 2845/08 indicam a necessidade da presença dessas faces para a realização dos ensaios. Outro fator notório e prejudicial para a determinação dos pontos de leitura efetuados no monumento é a variação de acabamento superficial presente no monumento, pois quanto maior a rugosidade, menor a acoplagem dos transdutores no mesmo. Os braços, pernas e objetos representados no monumento apresentam rugosidades satisfatórias; já os cavalos, as cabeças, os torsos e a canoa, apresentam rugosidade elevada, e

em muitos pontos, a exemplo da canoa, a superfície é de acabamento apicado, ou seja, muito irregular.

A base do monumento apresenta acabamento rústico, praticamente em estado bruto, exceto nas áreas planas e polidas, onde estão representados o mapa das bandeiras, na face frontal, e inscrições nas outras três faces do monumento.

A transmissão direta foi a única utilizada para as determinações das figuras do monumento, executadas em pontos opostos de uma secção transversal, de forma que os transdutores emissor e receptor estivessem frontalmente posicionados (Figuras 5A e 5B).

As avaliações pela transmissão semidireta não foram realizadas, pois requerem que os transdutores sejam posicionados em planos perpendiculares, o que não era possível de se assegurar em função das formas arredondadas do monumento.

A transmissão indireta não foi utilizada nas figuras, pois essas não apresentaram planos contínuos com rugosidade satisfatória onde esse tipo de transmissão pudesse ser empregado. Mas foi utilizada na área polida da base do monumento (Figura 5C). Para essa região, as transmissões direta e semidireta foram descartadas por não existirem meios de se posicionar os transdutores em faces paralelas ou perpendiculares.

Os três pares de transdutores foram utilizados no Monumento às Bandeiras. No entanto, os transdutores exponenciais não apresentaram resultados satisfatórios nos primeiros testes efetuados, pois o sinal emitido muitas vezes não era recebido. Assim, foram eliminados da pesquisa em função da baixa eficiência diante dos requisitos de leitura.

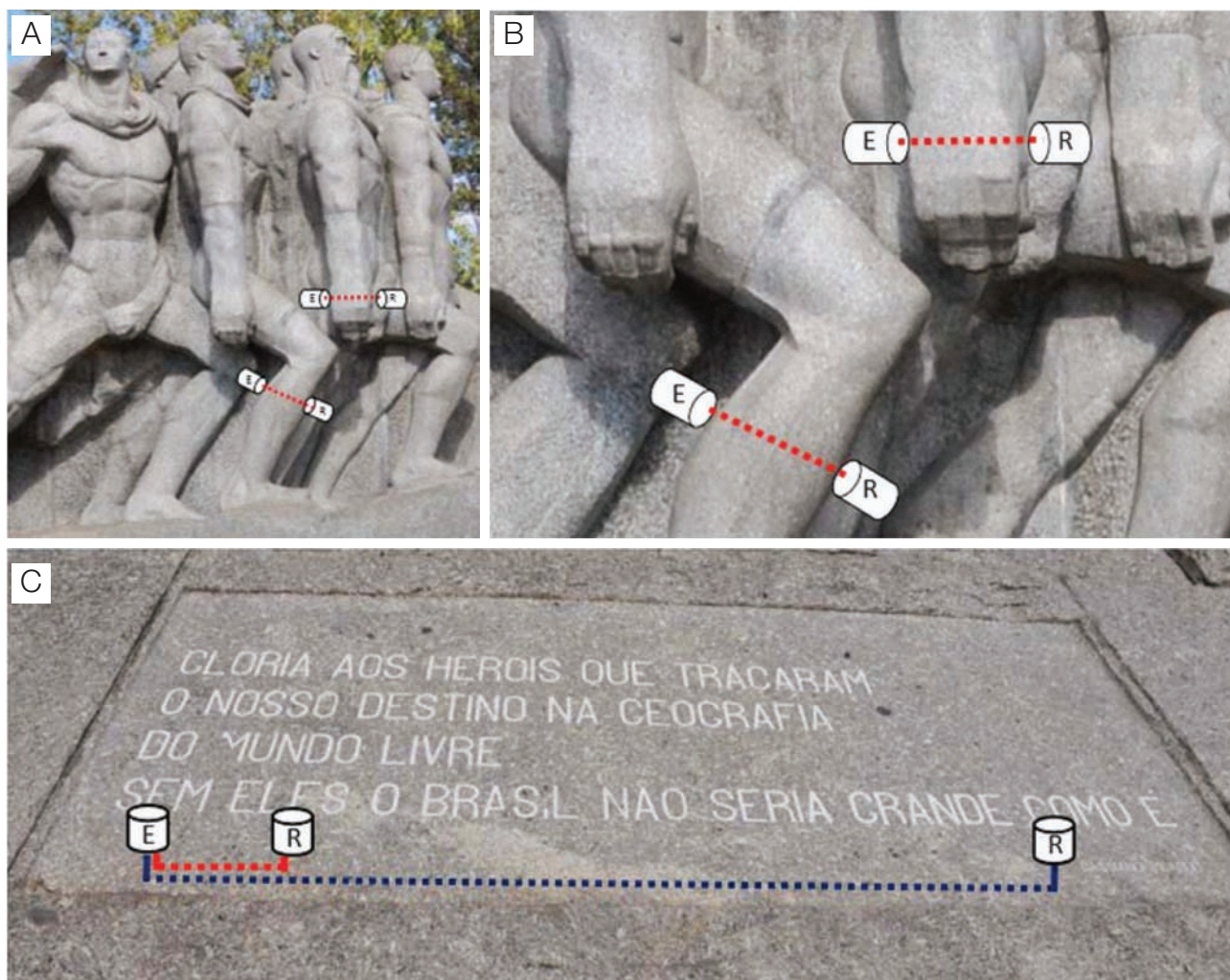


Figura 5. (A) Esquema ilustrativo da aplicação do método do ultrassom pela transmissão direta. Imagem das figuras e pontos de leitura no Monumento às Bandeiras, apresentando os transdutores emissor (E) e receptor (R); (B) detalhe dos pontos de leitura, posicionamento dos transdutores e percurso da onda; (C) exemplificação da aplicação da transmissão indireta em área polida na base do Monumento às Bandeiras.

Foram determinados 10 pontos na face direita do monumento, considerando como referência da vista frontal, conforme locais expostos na Figura 6, denominados de 1 a 10. É importante ressaltar que essa face do monumento está no sentido sudoeste, sendo a face que recebe menor insolação ao longo do dia.

Os resultados médios apresentaram diferenças relativamente grandes entre os três tipos de transdutores, conforme exposto na Tabela 1A, o que não ocorreu no laboratório entre os transdutores de 54 e 150 kHz. Quanto à discrepância do valor médio encontrado na utilização dos transdutores exponenciais, essa já era esperada, considerando o comportamento instável de sua utilização em laboratório.

Considerando os valores do desvio padrão, é visível que os transdutores de 54 kHz obtiveram valor muito elevado, assim como o valor do coeficiente de variação, se comparado aos transdutores de 150 kHz.

Embora as leituras efetuadas com os transdutores de 150 kHz tenham apresentado desvio padrão e coeficiente de variação relativamente altos, dentre os pares de transdutores utilizados, esses foram os mais estáveis na determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.

Quanto às leituras com os transdutores exponenciais, devido ao seu comportamento insatisfatório nos resultados

obtidos no laboratório e nas avaliações do Monumento às Bandeiras, elas não foram consideradas.

Observando a Figura 7A, é possível notar uma maior estabilidade nos resultados efetuados com os transdutores de 150 kHz, excetuando-se o ponto 1.

Os resultados obtidos com os transdutores de 54 kHz se distanciam muito da tendência dos demais, o que gera valores de desvio padrão e de coeficiente de variação elevados e com resultado médio da velocidade muito inferior ao esperado, dado o comportamento do par de transdutores de 150 kHz.

Essa ocorrência pode ser justificada em função da área de contato dos transdutores de 54 kHz, pois por possuírem superfícies planas com área superior às dos transdutores de 150 kHz apresentam atenuação da emissão e recepção da onda ultrassônica, sendo as curvaturas ou imperfeições da superfície do monumento geradoras de erros nas leituras, causadas por conta da interferência do acoplamento dos transdutores à base.

No lado esquerdo do monumento foram analisados 14 pontos (Figura 8). Diferentemente do ocorrido no lado direito do monumento, os resultados médios da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas obtidos apresentaram-se mais próximos comparando-se os dois pares de transdutores de 54 e 150 kHz, conforme exposto na Tabela 1B.

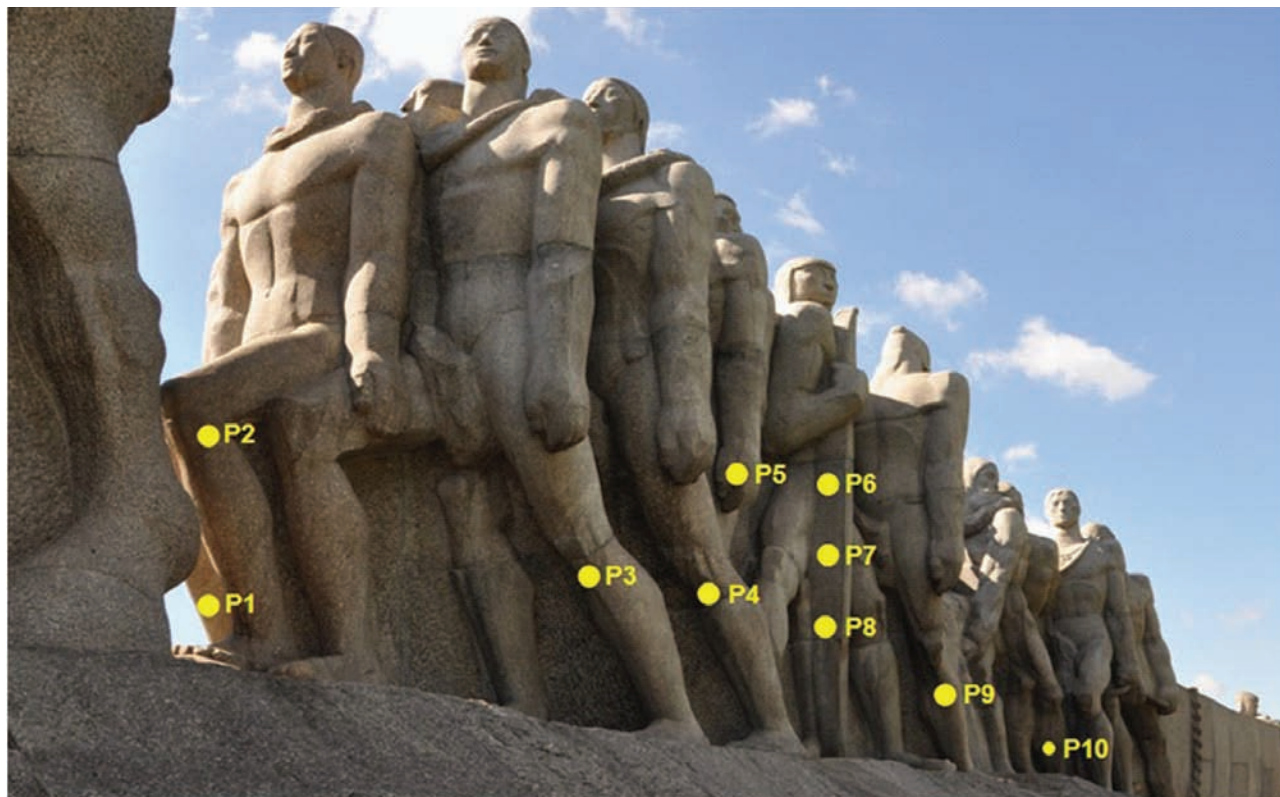


Foto: Lauro K. Dehira.

Figura 6. Distribuição dos pontos de leitura no lado direito do Monumento às Bandeiras.

Tabela 1. Resultados médios da propagação das ondas ultrassônicas fornecidos pelo Monumento às Bandeiras. Para localização dos pontos analisados, ver Figuras 6 e 8.

Ref.	Transmissão	Leituras	Transdutores	Velocidade média (km/s)	Desvio padrão (km/s)	Coefficiente de variação (%)
A	Direta	Lado direito	54 kHz	3,7	1,45	39,2
			150 kHz	4,7	0,67	14,3
			Exponenciais	2,0	0,65	32,5
B	Direta	Lado esquerdo	54 kHz	4,3	0,83	19,3
			150 kHz	4,4	0,44	10,0
C	Direta	Todas	54 kHz	4,0	1,2	30,0
			150 kHz	4,5	0,59	13,1
D	Direta	Todas após ratificações	54 kHz	4,5	0,85	18,9
			150 kHz	4,6	0,47	10,2
E	Direta	Todas após exclusões de pontos	54 kHz	4,8	0,42	8,8
			150 kHz	4,6	0,43	9,3
F	Indireta	Aumentando a distância	54 kHz	5,3	0,22	4,2
			150 kHz	5,2	0,20	3,8
G	Indireta	Distância fixa	54 kHz	5,2	0,33	6,3
			150 kHz	5,2	0,13	2,5

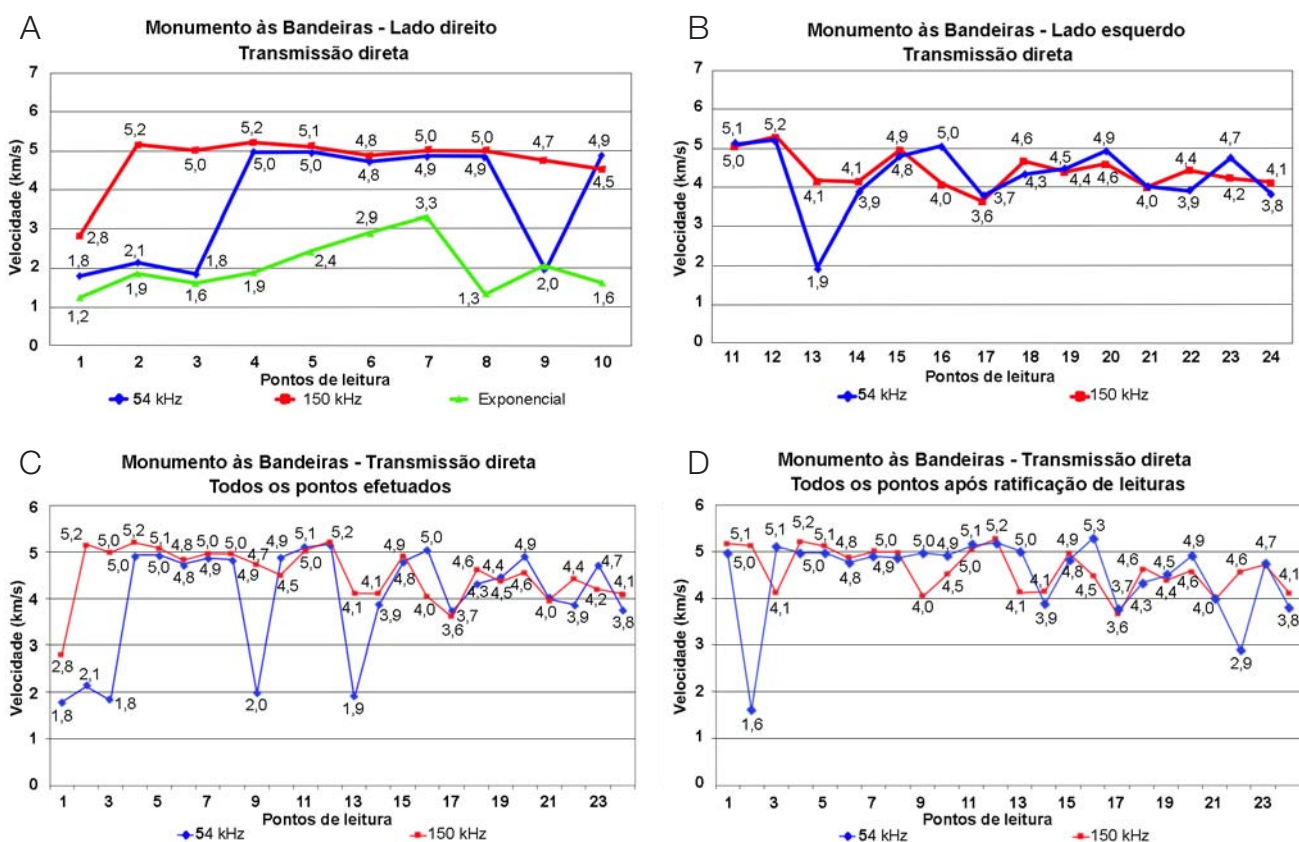


Figura 7. Leituras efetuadas pela transmissão direta no Monumento às Bandeiras. (A) leituras no lado direito; (B) leituras no lado esquerdo; (C) análise global de todos os pontos; (D) todos os pontos após leituras de correção.



Figura 8. Distribuição dos pontos de leitura no lado esquerdo do Monumento às Bandeiras.

Novamente, os valores referentes ao desvio padrão e coeficiente de variação apresentaram-se mais altos nas avaliações efetuadas com o transdutor de 54 kHz. No caso das adquiridas com os transdutores de 150 kHz, esses desvios apresentaram resultados satisfatórios. A Figura 7B ilustra valor discrepante para o transdutor de 54 kHz, explicando o alto valor do desvio padrão.

A Tabela 1C apresenta os valores e desvios referentes a todos os pontos avaliados com os transdutores de 54 e 150 kHz. Na análise global, os resultados das velocidades médias apresentaram valores ligeiramente distintos entre os dois pares de transdutores, discrepância que ocorre também nos desvios utilizados para análise.

Fica claro que os pontos onde as velocidades são inferiores a 3,0 km/s influenciam significativamente os resultados médios de cada par de transdutores, bem como os valores dos desvios (Figura 7C).

Em função desses resultados discrepantes, foi realizada outra etapa de medições no Monumento às Bandeiras, que consistiu na repetição de leituras onde os resultados das velocidades foram insatisfatórios.

Dessa forma, buscou-se determinar se a falha foi na operação durante as leituras ou se esses locais realmente influenciaram os resultados dos diferentes pares de transdutores utilizados, tendo em consideração que superfícies irregulares e com curvaturas poderiam favorecer as leituras com transdutores de menores áreas de contatos, como os de 150 kHz, em detrimento das leituras com os transdutores de 54 kHz de maiores áreas, ou, ainda, devido à presença de descontinuidades físicas na rocha. Foram então repetidas as análises com os dois pares de transdutores para oito dos pontos com resultados discrepantes, obtendo-se novas médias e desvios conforme a Tabela 1D.

A repetição ocasionou em maior aproximação entre os resultados médios das velocidades entre os pares de transdutores, ocorrendo considerável redução nos valores do desvio padrão. No entanto, o coeficiente de variação para os transdutores de 150 kHz atinge uma taxa próxima a 10%. Já os

transdutores de 54 kHz atingem um coeficiente de variação ainda elevado, 19%.

Após a repetição das leituras, alguns pontos ainda apresentavam resultados discrepantes, que foram ainda maiores para os pontos 2 e 22 na comparação dos valores obtidos pelos transdutores de 54 e 150 kHz. Os valores adquiridos para o par de transdutores de 150 kHz demonstram-se adequados; no entanto, esses dois pontos apresentam valores que se afastam consideravelmente da média obtida para os transdutores de 54 kHz (Figura 7D).

De forma a atingir melhores resultados nos valores de desvio padrão e coeficiente de variação entre pares de transdutores, foram desconsiderados os pontos 2 e 22. Ainda buscando reduzir a incerteza de medição, definiu-se que todos os resultados que excedessem 20% de afastamento em relação à média obtida após a exclusão desses pontos seriam igualmente excluídos. Com a aplicação dessa prática, ocorreu a exclusão de mais um ponto, obtendo-se coeficientes de variação inferiores a 10%, garantindo maior estabilidade de resultados.

Assim, foram obtidos valores médios de velocidade de 4,8 km/s para os transdutores de 54 kHz e de 4,6 km/s para os transdutores de 150 kHz.

Os resultados finais da avaliação da propagação de ondas ultrassônicas no Monumento às Bandeiras alcançaram valores médios das velocidades com diferenças entre os pares de transdutores de 2,7%, desvios padrão muito aproximados e coeficientes de variação com valores inferiores a 10%. Do total de 24 pontos de leitura efetuados pela transmissão direta, foram eliminados do cálculo final apenas resultados equivalentes a três pontos, o que caracteriza um aproveitamento de 87,5% das medições.

Portanto, considera-se que os valores médios apresentados na Tabela 1E demonstram a real condição física do Monumento às Bandeiras para a avaliação da propagação de onda ultrassônica pelo método da transmissão direta, considerando que o tratamento estatístico apenas aumentou 0,3 km/s os valores obtidos com os transdutores de 54 kHz. É importante ressaltar que os baixos valores

de velocidade encontrados também poderiam significar descontinuidades internas.

A base do monumento foi analisada pelo método indireto, utilizando os transdutores de 54 kHz e de 150 kHz. A definição dos pontos foi feita em uma linha, onde foram determinados 11 pontos para acoplamento dos transdutores emissores e receptores com espaçamento de 10 cm entre eles.

Foram empregadas duas formas de obtenção das leituras. Na primeira forma, o transdutor emissor foi mantido fixo no ponto 1 e as leituras foram realizadas aumentando-se a distância entre os transdutores emissor e receptor, iniciando as leituras entre os pontos 1 e 2, passando gradualmente por cada ponto até alcançar a leitura entre os pontos 1 e 11 (Figura 5C).

A Tabela 1F apresenta os valores médios da propagação de ondas ultrassônicas obtidos pela transmissão indireta utilizando a forma de avaliação com aumento da distância.

Os resultados obtidos apresentaram-se muito próximos, e os valores dos desvios obtidos também se mostraram adequados, ocorrência que pode ter se dado em função da superfície polida, sem irregularidades, o que favoreceu consideravelmente a acoplamento dos transdutores.

A Figura 9A apresenta graficamente o comportamento e distribuição dos resultados para os dois pares de transdutores. Era esperada uma diminuição da velocidade conforme aumento da distância, mas isso não se confirmou.

As outras medições efetuadas pela transmissão indireta utilizou dos mesmos pontos para as leituras; no entanto, os transdutores foram posicionados com uma distância fixa de 20 cm entre eles. Dessa forma, as leituras foram executadas dos pontos 1 para 3, 2 para 4, 3 para 5, e assim sucessivamente até atingir os pontos 8 para 10 (Figura 5C).

A Tabela 1G apresenta os valores médios da propagação de ondas ultrassônicas aplicados pela transmissão indireta utilizando distância fixa. Nessa determinação, o valor

médio da velocidade obtida para ambos os transdutores são similares entre si e similares aos obtidos na análise anterior.

A Figura 9B aponta a maior estabilidade dos resultados obtidos com os transdutores de 150 kHz; os transdutores de 54 kHz apresentam resultados também estáveis. No entanto, pequenas variações dos valores da velocidade obtidos representam o aumento dos desvios a esses conferidos.

Avaliações em laboratório

A Tabela 2A apresenta os resultados médios da determinação da propagação de ondas ultrassônicas pelo método direto utilizando diferentes transdutores para a amostra analisada em laboratório. É possível verificar que os transdutores de 54 kHz e de 150 kHz apresentaram resultados similares, sendo que os transdutores exponenciais geraram resultados com valores inferiores. Os resultados de desvio padrão e coeficiente de variação com os transdutores de 54 kHz e de 150 kHz também apresentaram maior estabilidade entre as leituras, sendo esses mesmos parâmetros muito elevados usando os transdutores exponenciais. A discrepância dos valores obtidos com os transdutores exponenciais são visíveis em análise gráfica. (Figura 10A).

Na transmissão semidireta, observa-se que existe uma tendência entre os transdutores de 54 e 150 kHz em apresentar velocidades entre 5,0 e 6,0 km/s, o que confirma a maior confiabilidade para esses transdutores, enquanto os transdutores exponenciais não apresentam homogeneidade de resultados (Figura 10B). Nota-se que com a mudança do tipo de transmissão de direta para semidireta, os resultados das velocidades apresentaram-se dentro do mesmo intervalo considerando os transdutores planos, conferindo-lhes boa estabilidade, o que não ocorre com os transdutores exponenciais. A diferença mais visível para os transdutores exponenciais foi o aumento do desvio padrão e do coeficiente de variação (Tabela 2B).

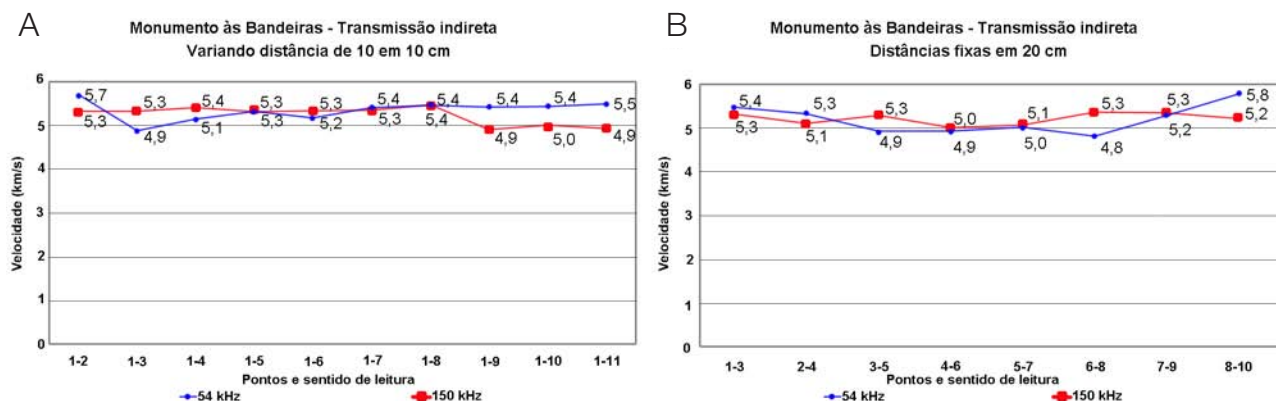


Figura 9. Avaliações efetuadas pela transmissão indireta. (A) aumento gradual de 10 em 10 cm entre os transdutores; (B) mantendo-se a distância fixa de 20 cm entre os transdutores.

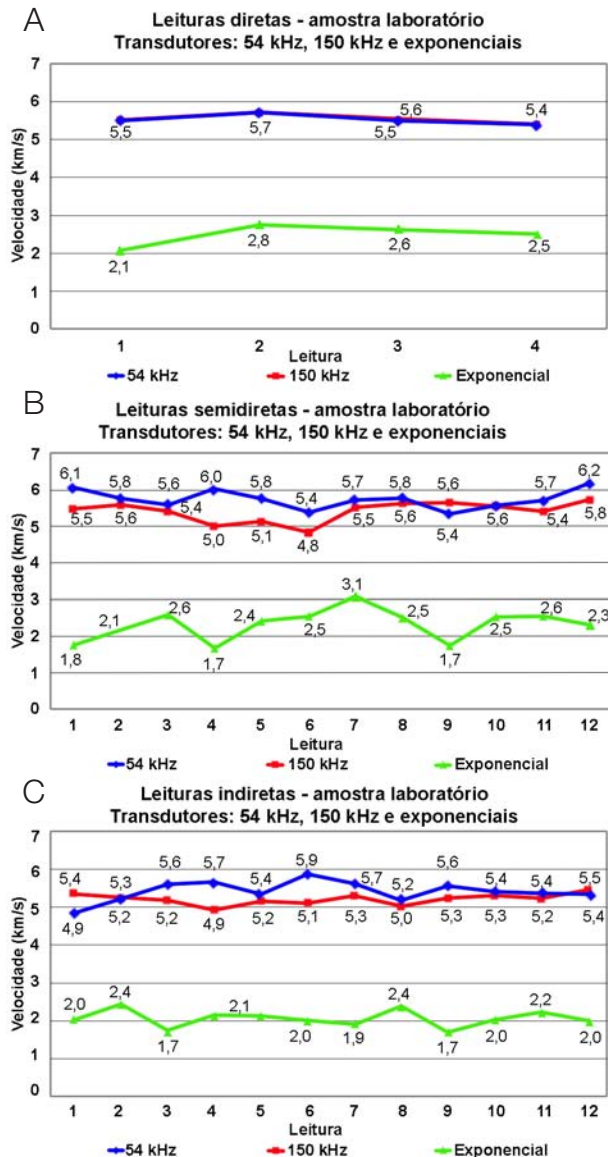


Figura 10. Ensaios com amostra de laboratório. (A) transmissão direta; (B) transmissão semidireta; (C) transmissão indireta.

Tabela 2. Resultados médios da propagação das ondas ultrassônicas das transmissões direta, semidireta e indireta fornecidos pelo corpo-de-prova através de determinações em laboratório.

Ref.	Transmissão	Transdutores	Velocidade média (km/s)	Desvio padrão (km/s)	Coefficiente de variação (%)
A	Direta	54 kHz	5,5	0,10	1,8
		150 kHz	5,6	0,14	2,5
		Exponenciais	3,5	0,76	21,7
B	Semidireta	54 kHz	5,8	0,26	4,5
		150 kHz	5,4	0,28	5,2
		Exponenciais	3,3	0,59	17,9
C	Indireta	54 kHz	5,4	0,28	5,2
		150 kHz	5,2	0,15	2,9
		Exponenciais	3,0	0,28	9,3

Na transmissão indireta (Figura 10C), considerada a menos favorável para execução de análises, ocorreu uma grande dispersão dos valores das velocidades, embora esses apresentem um intervalo coerente para cada tipo de transdutor. No entanto, vemos que o transdutor de 54 kHz apresenta os valores médios mais próximos dos resultados obtidos nas transmissões direta e semidireta, mas o coeficiente de variação se eleva, o que já não ocorre com o transdutor de 150 kHz que apresenta redução nesse quesito (Tabela 2C).

Correlação entre as análises de laboratório e Monumento às Bandeiras

A Tabela 3 apresenta os valores mínimos, máximos e médios das velocidades de propagação de ondas ultrassônicas, obtidos em laboratório e no monumento pelas avaliações das transmissões direta e indireta com os transdutores de 54 kHz e 150 kHz. Ilustra, também, que os resultados obtidos pela transmissão direta no Monumento às Bandeiras apresentam o valor médio da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas 14,5% abaixo do resultado do valor médio obtido em laboratório para os transdutores de 54 kHz, e de 18% para os transdutores de 150 kHz. É importante destacar a discrepância dos valores mínimos e máximos entre os resultados de laboratório e do monumento, sendo perceptível a melhor acuracidade dos valores adquiridos no laboratório cuja variação entre os valores mínimos e máximos se situa na casa dos 0,3 km/s, ao passo que no monumento essa diferença chega a 1,5 km/s.

Alguns fatores corroboram para esse afastamento entre resultados no monumento, em sua grande maioria trata-se de características físicas, como a variação na rugosidade da superfície de cada ponto analisado, juntamente com a quantidade de acoplante necessária para a conexão entre transdutor e base, fator que pode apresentar condições distintas para cada par de transdutores.

Entretanto, não devem ser descartados fatores que digam respeito à alterabilidade da rocha do monumento em exposição há 60 anos, considerando que o mesmo é constituído de diversos blocos e, dessa forma, sujeitos a diferentes intensidades

Tabela 3. Síntese dos valores médios da propagação de ondas ultrassônicas obtidos no Monumento às Bandeiras e pelo corpo-de-prova em laboratório.

Transdutores	Transmissão	Análises em laboratório Velocidade (km/s)			Monumento às Bandeiras Velocidade (km/s)		
		Min.	Máx.	Média	Min.	Máx.	Média
54 kHz	Direta	5,4	5,7	5,5	3,8	5,3	4,8
	Indireta	4,9	5,9	5,4	4,8	5,8	5,3
150 kHz	Direta	5,4	5,7	5,6	4,0	5,2	4,6
	Indireta	4,9	5,5	5,2	4,9	5,4	5,2

das ações intempéricas em função de possíveis heterogeneidades petrográficas exibidas pelos diferentes blocos.

Os valores obtidos pelo método indireto apresentam maior discrepância de valores máximos e mínimos para os transdutores de 54 kHz, da ordem de 1,0 km/s tanto para as determinações efetuadas no laboratório quanto para as obtidas no monumento. Já para os transdutores de 150 kHz, essa variação é da ordem de 0,5 km/s para as determinações no monumento e 0,6 km/s para as obtidas no laboratório.

Os resultados adquiridos neste estudo pela técnica da propagação de ondas ultrassônicas são coerentes com trabalhos similares da literatura. Frazão e Farjallat (1996) apresentam resultados de mais de uma década de ensaios realizados em cerca de uma centena e meia de rochas silicáticas, confirmando uma média de velocidade de propagação longitudinal de ondas ultrassônicas maior ou igual a 4 km/s para rochas brasileiras, ratificando os resultados obtidos neste estudo.

Outros trabalhos utilizam esse método em rochas similares, porém com objetivos distintos. Frascá (2003) estuda diversas rochas graníticas em laboratório, efetuando o ensaio de ultrassom prévia e posteriormente à indução de alteração acelerada. Em seu estudo, os valores das rochas inalteradas variam de 3 a 5 km/s.

Navarro et al. (2003) utilizam essa técnica para o controle de qualidade de placas de rochas silicáticas utilizadas em fachadas, apresentando a correlação da velocidade ultrassônica com o módulo de ruptura e com a compressão uniaxial para onze rochas, obtendo em rochas graníticas velocidades na ordem de 5,0 km/s.

Grossi (2013) avalia bloco de Granito Itaquerá fresco, obtendo resultados médios de 4,4 km/s na transmissão direta, 5,0 km/s na semidireta e 4,3 a 5,3 km/s na indireta, e os correlacionam com os valores obtidos no Monumento a Ramos de Azevedo.

Esses dados ratificam que a técnica da propagação de ondas ultrassônicas é adequada e recomendada a estudos não destrutivos aplicável em rochas graníticas e monumentos pétreos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todas as determinações efetuadas no laboratório, bem como no Monumento às Bandeiras, contaram com os mesmos

procedimentos, utilizando os transdutores planos de 54 e 150 kHz e exponenciais de 54 kHz.

Ficou clara a baixa eficiência na obtenção de resultados pela utilização dos transdutores exponenciais, pois os valores obtidos com estes não apresentaram coerência com os valores obtidos no laboratório, repetindo-se o problema na aplicação no Monumento às Bandeiras. Assim, houve progresso apenas com a utilização dos transdutores de 54 e 150 kHz.

Os transdutores de 54 kHz apresentaram resultados coerentes, assim como os transdutores de 150 kHz. Porém, por possuírem superfícies de contato maiores que os de 150 kHz, o par de 54 kHz é mais suscetível à influência das irregularidades existentes nas superfícies medidas, pois dependendo das dimensões das imperfeições ou curvaturas, faz com que a camada de acoplante seja a única maneira de efetuar o contato, e o uso de acoplante em uma camada espessa interfere consideravelmente na emissão e recepção de onda.

Dos três pares de transdutores utilizados neste estudo, os transdutores de 150 kHz foram os que demonstraram maior estabilidade nas leituras, tanto nas avaliações efetuadas em laboratório quanto as realizadas pela transmissão direta e indireta no Monumento às Bandeiras.

A correlação entre os resultados obtidos no corpo-de-prova em laboratório e os fornecidos pelo granito do Monumento às Bandeiras se mostram coerentes entre si, com um decréscimo de velocidade da propagação da ordem de 14 a 18%, dependendo do transdutor utilizado para o caso do monumento, o que era esperado para rochas com superfícies mais irregulares e expostas há tantos anos.

Para os transdutores de 54 kHz, o valor médio das velocidades obtido no laboratório para a transmissão direta foi de 5,5 km/s, sendo o valor médio obtido no monumento de 4,8 km/s. Esse mesmo par de transdutores apresentou na transmissão indireta média das velocidades apuradas no laboratório de 5,4 km/s e no monumento 5,3 km/s.

Já os transdutores de 150 kHz apresentaram no laboratório média das velocidades na transmissão direta de 5,6 km/s, sendo o valor médio obtido por essa transmissão no monumento de 4,6 km/s. Na transmissão indireta, a média dos valores obtidos no laboratório foi de 5,2 km/s, mesmo valor obtido no monumento.

Os resultados obtidos neste estudo permitem concluir que nos mais de 60 anos de exposição do Monumento às

Bandeiras, seu intemperismo é muito sutil, pois, de acordo com os valores obtidos pela velocidade de propagação de ondas ultrassônicas pela transmissão direta, é pequena a alteração de suas características físicas.

Já para a transmissão indireta, essa diferença é pouco expressiva, pois, tanto para os transdutores de 54 kHz quanto para os de 150 kHz, os resultados máximos e mínimos obtidos no Monumento às Bandeiras encontram-se dentro dos intervalos mínimos e máximos determinados no laboratório, o que caracteriza a possível inexistência de efeitos intempéricos sobre o monumento, embora a transmissão indireta possa apresentar valores referentes unicamente à superfície da amostra analisada, o que nos leva a concluir que a placa polida avaliada não apresenta alterações de suas características físicas.

A baixa variação obtida pela transmissão indireta sobre a placa polida do monumento está favorecida pela condição superficial da área estudada, o que não ocorre nas avaliações efetuadas pela transmissão direta no mesmo, pois o posicionamento de transdutores sobre superfícies curvas e irregulares pode gerar erros de leituras.

As avaliações realizadas neste estudo nos permitem perceber que a transmissão direta é a mais aconselhável a ser efetuada, uma vez que a propagação de ondas ultrassônicas tem de transpor o volume do corpo amostrado, considerando todo o percurso da onda através da seção avaliada a cada leitura. Sempre que possível, as avaliações devem ser efetuadas sobre superfícies lisas ou polidas, pois irregularidades superficiais prejudicam o contato dos transdutores com a amostra.

Diante da experiência adquirida neste estudo, considera-se que a melhor configuração de aparelho para análises ultrassônicas em rochas graníticas está mais relacionada à frequência e forma de contato dos transdutores. Diversos são os aparelhos disponíveis no mercado que atendem às necessidades. No entanto, recomenda-se a escolha de transdutores planos e, se possível, mais de um par de transdutores com frequências e áreas de contato distintas. A utilização de pelo menos dois pares de transdutores favoreceu a pesquisa, já que a correlação entre os transdutores planos de 54 e 150 kHz forneceu parâmetros comparativos que auxiliaram nas avaliações efetuadas. Portanto, sugere-se que essa prática seja levada em consideração em estudos futuros.

O presente estudo é uma proposta metodológica específica aplicável a monumentos constituídos em rocha, portanto considera-se que o mesmo pode ser uma referência na adequação de um projeto de norma para tal aplicação.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão do auxílio à pesquisa (Proc. n. 2009/02519-8).

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8802. (1994). *Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica*. Rio de Janeiro.
- Almeida, F. F. M. de, Hasui, Y., Brito Neves, B. B. de, Fuck, R. A. (1977). As províncias estruturais brasileiras. 8º *Simpósio de Geologia do Nordeste*, v. 6, 363-391. Campina Grande: SBG.
- Almeida, F. F. M. de, Hasui, Y., Poncano, W. L., Dantas, A. S. L., Carneiro, C. D. R., Melo M. S. de, Bistrichi C. A. (1981). *Mapa Geológico do Estado de São Paulo*. Escala 1:500.000. Nota Explicativa. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.
- Almesberger, D., Geometrante, R., Rizzo, A. (2000). Ultrasonic Testing Method for the Characterization of Pietra D'Istria Structural Elements. 9th *International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, v. 2, 317-325. Veneza.
- Alves, A. (2009). *Petrogênese de Plútons Graníticos do Leste Paulista: Geocronologia, Geoquímica Elemental e Isotópica*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências – USP.
- ASTM – American Society for Testing and Materials. D 2845. (2008). *Standard method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock*. Philadelphia.
- Batista, M. R. (1985). *Bandeiras de Brecheret: história de um monumento (1920 – 1953)*. São Paulo: Departamento do Patrimônio Histórico.
- Del Lama, E. A. (2006). Geologia e Herança Cultural. *Revista Brasileira de Geociências*, 36(2), 379-381.
- Del Lama, E. A., Dehira, L. K., Reys, A. C. dos. (2009). Visão Geológica dos Monumentos da Cidade de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, 39(3), 409-420.
- DPH – Departamento do Patrimônio Histórico. *Inventário de Obras de Arte em Logradouros Públicos da Cidade de São Paulo: Monumento às Bandeiras*. Acesso em 13 de outubro de 2012. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/cultura/patrimonio_historico/adote_obra/index.php?p=4526>.
- Fitzner, B. (2004). Documentation and evaluation of stone damage on monuments. 10th *International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, 667-690. Estocolmo.

- Frasca, M. H. B. O. (2003). *Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências – USP.
- Frazão, E. B., Farjallat, J. E. S. (1996). Proposta de Especificação para Rochas Silicáticas de Revestimento. 8º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, v. 1, 369-380. Rio de Janeiro: ABGE.
- Grossi, D. (2013). *Análise do estado de conservação do Monumento a Ramos de Azevedo com utilização de métodos não destrutivos*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências – USP.
- Janasi, V. A., Alves, A., Vlach, S. R. F., Leite, R. J. (2003). Granitos Peraluminosos da Porção Central da Faixa Ribeira, Estado de São Paulo: Sucessivos Eventos de Reciclagem da Crosta Continental no Neoproterozóico. *Revista Geologia USP. Série Científica*, 3, 13-24.
- Köhler, W., Rohatsch, A., Weber, J. (1996). The Stone Material of the West Portal of St. Stephen's Cathedral in Vienna: Petrological and Ultrasonic Investigation. 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, v. 2, 759-767. Berlim.
- Kuzmickas, L. (2013). *Estado de conservação dos monumentos pétreos do Cemitério da Consolação, São Paulo*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências – USP.
- Maia, S. M. C. (2004). *Estudo integrado geológico/tecnológico de rochas: os granitos Flores e Jacarandá, RN*. Dissertação (Mestrado). Natal: Centro de Ciências Exatas e da Terra – UFRN.
- Marques, E. A. G., Barroso, E. V., Menezes Filho, A. P., Vargas Jr., E. A. (2010). Weathering zones on metamorphic rocks from Rio de Janeiro – Physical, mineralogical and geomechanical characterization. *Engineering Geology*, 111, 1-18.
- Moreno, M. A. (2003). Metodología de diagnóstico y evaluación de tratamientos para la conservación de los edificios históricos. Introducción. *Metodología de Estudios Previos y Propuesta de Tratamientos. Cuadernos Técnicos*. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico.
- Myrin, M., Malaga, K. (2008). Evaluation of Consolidation Treatment of Sandstone by Use of Ultrasound Pulse Velocity. 11th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, v. 1, 441-448. Torun, Polônia.
- Navarro, F. C., Artur, A. C., Meyer, A. P. (2003). Velocidade de Ultra-Som como Controle de Qualidade de Granitos Aplicados em Fachadas e Funções Estruturais. IV Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, 140-152. Fortaleza.
- Papida, S., Murphy, W., May, E. (2000). The Use of Sound Velocity Determination for the Non-Destructive Estimation of Physical and Microbial Weathering of Limestones and Dolomites. 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, v. 1, 609-617. Veneza.
- Pelizan, T. R. (2004). *Estudo de propriedades mecânicas de peças roliças de eucalipto citriodora utilizando a técnica de ultra-som*. Dissertação (Mestrado). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – USP.
- Rodrigues, N. M. (2012). *Ensaio não destrutivo em monumentos pétreos paulistanos*. Trabalho de Formatura (Monografia). São Paulo: Instituto de Geociências – USP.
- Rossi-Manaresi, R., Tucci, A. (1983). Ultrasonic Test for the Evaluation of the Effectiveness of Sandstone Consolidation. 1st International Conference on Non-Destructive Testing in Conservation of Works of Art, pIII/11.1-11.17. Roma: Associazione Italiana Prove Non Distruttive – Istituto Centrale per il Restauro.
- Silva, L. C. T. da. (2005). *Avaliação da degradação de rochas em fachadas de prédios históricos: os exemplos do Teatro Municipal e do Paço Imperial, Cidade do Rio de Janeiro*. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro: Instituto de Geociências – UFRJ.
- Sheremeti-Kabashi, F., Snethlage, R. (2000). Determination of Structural Anisotropy of Carrara Marble with Ultrasonic Measurements. 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, v. 1, 247-253. Veneza.
- Topal, T., Doyuran, V. (1995). Ultrasonic Testing of Artificially Weathered Cappadocian Tuff. *Preservation and Restoration of Cultural Heritage. Proceeding of the 1995 LCP Congress*, 205-211. Montreux.
- Valdeón, L., King, M. S., De Freitas M. H. (1992). Ultrasonic Methods for Quantifying the Degradation of Building Stones. 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, v. 2, 697-704. Lisboa: LNEC.